

Д. Т. Н. Ю. Е. Пивинский¹ (✉), П. В. Дякин², Л. В. Остряков³

¹ ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

³ ОАО «Динур», г. Первоуральск, Россия

УДК 666.76.017:620.181.428.4

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФОРМОВАННЫХ И НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ВКВС.

Часть 11. ВКВС композиционного состава (плавленый корундобоксит, спеченный боксит, кварцевое стекло) и некоторые свойства материалов на их основе^{*1}

Методом совместного мокрого измельчения получены ВКВС композиционного состава с использованием в качестве базовых материалов плавленого корундобоксита с содержанием 93,4 % Al_2O_3 (45 %) и спеченного китайского боксита (45 %). В качестве дополнительного компонента в состав мелющей загрузки введено высокодисперсное кварцевое стекло (10 %). Изучено влияние температуры обжига в интервале 900–1600 °С на спекание и муллитизацию материала. После обжига образцов при 1200 °С достигнуты значения предела прочности при изгибе 150 МПа. Установлены интервалы температур спекания (усадки) и муллитизации (роста) материала.

Ключевые слова: боксит китайский и гайанский, плавленый корундобоксит, кварцевое стекло, мокрое измельчение, ВКВС, гетеростабилизация, спекание, муллитизация, тепловое расширение, неизотермический нагрев, dilatометрические исследования.

В настоящей работе поставлена задача получения и изучения некоторых свойств материалов из ВКВС, в которых в качестве основных исходных компонентов использован китайский боксит марки Rota-HD [1–3] в сочетании с корундобокситом, наплавленным из шихты, состоящей из 75 % технического глинозема и 25 % гайанского боксита. Характеристика этого боксита приведена в работе [4]. Как и во всех предыдущих работах настоящей серии [1, 2, 4–11] в качестве дополнительного компонента вводили высокодисперсное кварцевое стекло (ВДКС) в количестве 10 мас. % на сухое вещество.

Получение и свойства ВКВС композиционного состава

Как и в предыдущих работах [4, 10], для получения плавленого корундобоксита применяли

^{*1} Продолжение. Части 1–3 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 8, 10, 12 за 2015 г., части 4–8 — в № 2, 4, 6, 10 и 12 за 2016 г., части 9 и 10 — в № 2 и 4 за 2017 г.



Ю. Е. Пивинский
E-mail: pivinskiy@mail.ru

обожженный при 1200 °С гайанский боксит с содержанием Al_2O_3 80–82 %, SiO_2 10–11 %. С целью повышения содержания Al_2O_3 в исходной ВКВС в отличие от работ [4, 10] содержание технического глинозема в плавленом продукте было повышено до 75 % с соответствующим уменьшением количества боксита. Наплавленный корунд заданного состава подвергали измельчению, фракционированию и магнитной сепарации. В полученном корундобоксите содержалось, %: Al_2O_3 93,8, SiO_2 2,4, TiO_2 1,9, Fe_2O_3 0,7, $\text{CaO} + \text{MgO}$ 0,93. Содержание Al_2O_3 и SiO_2 в китайском бокситовом шамоте марки Rota-HD 89 и 6 % соответственно.

С учетом того что состав мелющей загрузки по массе состоял из 45 % корундобоксита, 45 % бокситового шамота и 10 % ВДКС, в конечной ВКВС указанного композиционного состава содержалось Al_2O_3 82,5 % и SiO_2 13,9 %.

Процесс совместного мокрого измельчения осуществляли в промышленной шаровой мельнице с керамической футеровкой и рабочим объемом 3,5 м³ высокоглиноземистыми мелющими телами, содержащими около 78 % Al_2O_3 и 17 % SiO_2 . Вследствие этого намола мелющих тел (1,0–1,5 %) не оказывал существенного влияния на химический состав твердой фазы ВКВС.

В качестве исходных материалов использовали шамот китайского боксита Rota-HD фрак-

ции 1–3 мм и плавленный корундобоксит полидисперсной фракции мельче 1,0 мм, содержащей 15 % частиц мельче 0,1 мм и до 50 % частиц мельче 0,5 мм. Несмотря на магнитную сепарацию, фракция корундобоксита содержала до 0,15 % примесей железа. В качестве третьего компонента в количестве 10 мас. % на сухое вещество в состав мелющей загрузки вводили высокодис-

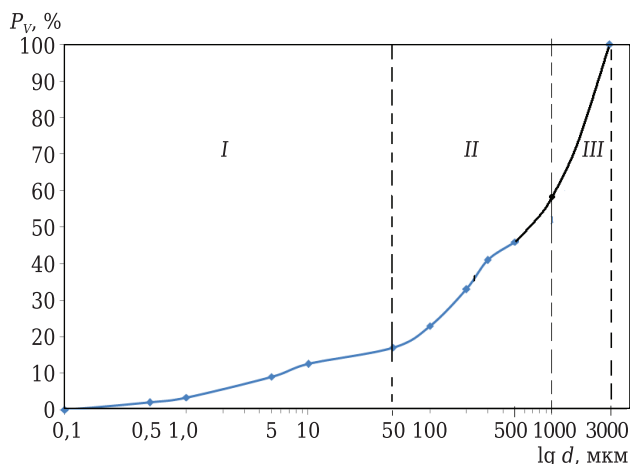


Рис. 1. Интегральная кривая объемного распределения зернового состава мелющей загрузки материалов при получении ВКВС композиционного состава: I — интервал ВДКС; II — плавленного корундобоксита; III — бокситового шамота

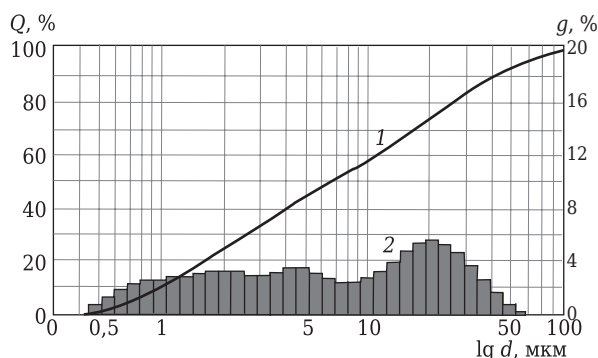


Рис. 2. Интегральное g (1) и дифференциальное Q (2) объемное распределение частиц по размерам в ВКВС композиционного состава

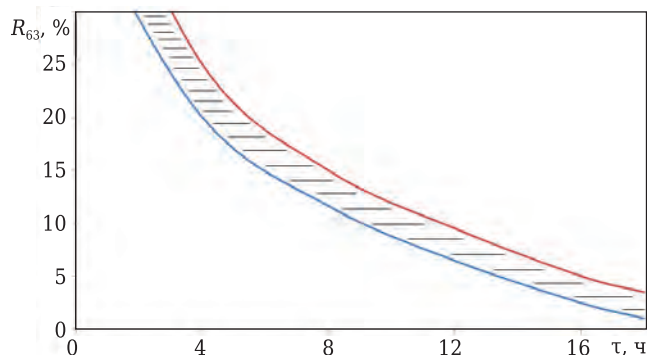


Рис. 3. Влияние продолжительности τ мокрого измельчения ВКВС композиционного состава на содержание R_{63} в твердой фазе частиц размером более 63 мкм

персную суспензию плавленного кварца (ВДКС), характеризующуюся преобладающим количеством частиц менее 10 мкм при $d_{\max} = 40 \div 50$ мкм.

Мокрое совместное измельчение компонентов проводили с одностадийной загрузкой [3, 12] при объемной концентрации $C_v \approx 0,70$ или влажности около 11 %. Несмотря на наличие определенного объема открытой пористости в бокситовом шамоте (водопоглощение 2–3 %), что обуславливает поглощение части воды в первичной загрузке, процесс мокрого измельчения протекал относительно интенсивно. В значительной мере это обусловлено полидисперсным зерновым составом частиц твердой фазы в исходной загрузке. Как следует из данных рис. 1, в интегральной кривой зернового распределения объемная доля частиц твердой фазы, соответствующей ВДКС (интервал I), составляет 17 %, плавленного корундобоксита (интервал II) — 41 % и бокситового шамота (интервал III) — 42 %.

Принятая полифракционная загрузка уже на первой стадии измельчения, несмотря на весьма низкое объемное содержание воды, обеспечивает значительную подвижность (текучесть) системы благодаря высокой степени ее полидисперсности. Значение показателя полидисперсности K_n [3, 12] достигает 30, что способствует получению требуемой текучести системы благодаря оптимальному распределению частиц среднего размера — в зазорах между крупными, а высокодисперсных (ВДКС) — в зазорах среднего размера. Следует отметить, что степень полидисперсности исходной загрузки в значительной мере влияет на зерновое распределение частиц твердой фазы ВКВС. Из рис. 2 следует, что последнее и для ВКВС характеризуется существенной степенью полидисперсности.

Согласно дифференциальному распределению Q частиц твердой фазы отчетливо проявляется пиковое значение в области диаметра частиц $d = 20$ мкм (см. рис. 2). Предполагается, что весь интервал частиц в области $d = 10 \div 100$ мкм состоит преимущественно из частиц на основе боксита. Менее выраженный пик отмечается при $d = 4 \div 5$ мкм. Для этой области дисперсности (от 2–3 до 10 мкм) характерно преимущественное содержание частиц измельченного корундобоксита. Преимущественный размер частиц ВДКС менее 2 мкм. Твердая фаза ВКВС рассмотренного композиционного состава характеризуется медианным диаметром частиц $d_m = 7,0$ мкм и K_n (K_{80}/K_{20}) около 14, что свидетельствует о возможности получения при формовании полуфабриката повышенной плотности [3, 12].

На рис. 3 по результатам обработки экспериментальных данных четырех помолов ВКВС рассматриваемого состава представлена область кинетики мокрого измельчения по показателям содержания частиц крупнее 63 мкм.

Из приведенных данных следует, что уже через 2 ч мокрого измельчения содержание этих ча-

стиц не превышает 30 %, а через 9–10 ч помола — 10 %. При этом заданная степень дисперсности (остаток на сите с ячейкой 63 мкм не более 3 %) достигается через 15–18 ч мокрого измельчения, что сопоставимо с результатами помола аналогичных ВКВС бокситового состава. Следует отметить, что в процессе получения ВКВС подобного состава [3, 13] обнаружен эффект ускоренного процесса измельчения кварцевого стекла по сравнению с частицами боксита. Поэтому в ВКВС подобного состава основная доля частиц с размерами до 2–3 мкм (см. рис. 2) представлена ВДКС, а их удельная поверхность превышает суммарный показатель для частиц остальной твердой фазы.

Между тем следует отметить, что полидисперсность в процессе получения ВКВС является только одним из факторов. При мокром измельчении протекают сложные процессы, обуславливающие не только достижение заданной дисперсности, но и механохимические эффекты, определяющие активацию частиц дисперсной фазы. Еще более сложными являются протекающие при мокром измельчении ВКВС композиционного состава процессы кислотно-основного взаимодействия [3, 12, 14]. Известно, что как реотехнологические свойства ВКВС, так и характеристики получаемого на их основе полуфабриката (пористость, прочность или вяжущие свойства) при прочих равных условиях определяются показателем ионного потенциала (ИП) частиц твердой фазы [3, 14, 15].

Применительно к ВКВС рассматриваемого состава процесс осложняется тем, что исходный материал характеризуется не только кислотным (SiO_2) или амфотерным (Al_2O_3 и TiO_2) составом, но и основным (примеси MgO , CaO , Na_2O). Как показано в работах [15, 16], посвященных получению ВКВС в системе электрокорунд – ВДКС, высокая степень разжижения и стабилизации в подобных суспензиях достигается благодаря гетеростабилизации частиц Al_2O_3 высокодисперсными частицами SiO_2 . Несмотря на то, что массовое содержание ВДКС в настоящей работе составляло 10 % (объемное — 17 %), по удельной поверхности высокодисперсного кварцевого стекла (см. рис. 2) многократно превосходит этот показатель частиц остальной твердой фазы. Предполагается, что мелкие частицы ВДКС (<1 мкм) адсорбируются на поверхности более крупных частиц Al_2O_3 , создавая вокруг них своеобразный «ореол» и обеспечивая тем самым эффект гетеростабилизации ВКВС композиционного состава. С учетом наличия в ВДКС наночастиц в работах [16, 17] сформулировано понятие о механизме наностабилизации суспензий смешанного состава.

Влияние температуры обжига на свойства материалов

Как и в предыдущих работах [5–10], процесс спекания и муллитизации образцов в интервале тем-

ператур обжига 900–1600 °C с изотермической выдержкой 1 ч изучали на отливках размерами 10×10×80 мм с открытой пористостью 17–18 %. На рис. 4 показано влияние температуры обжига на открытую пористость и кажущуюся плотность, усадку или рост и предел прочности при изгибе образцов на основе ВКВС композиционного состава.

Как следует из рис. 4, изученные температуры обжига разбиты на три характерных интервала, отличающихся преобладающим механизмом протекающих при этом процессов. В интервале I реализуется процесс первичного спекания или усад-

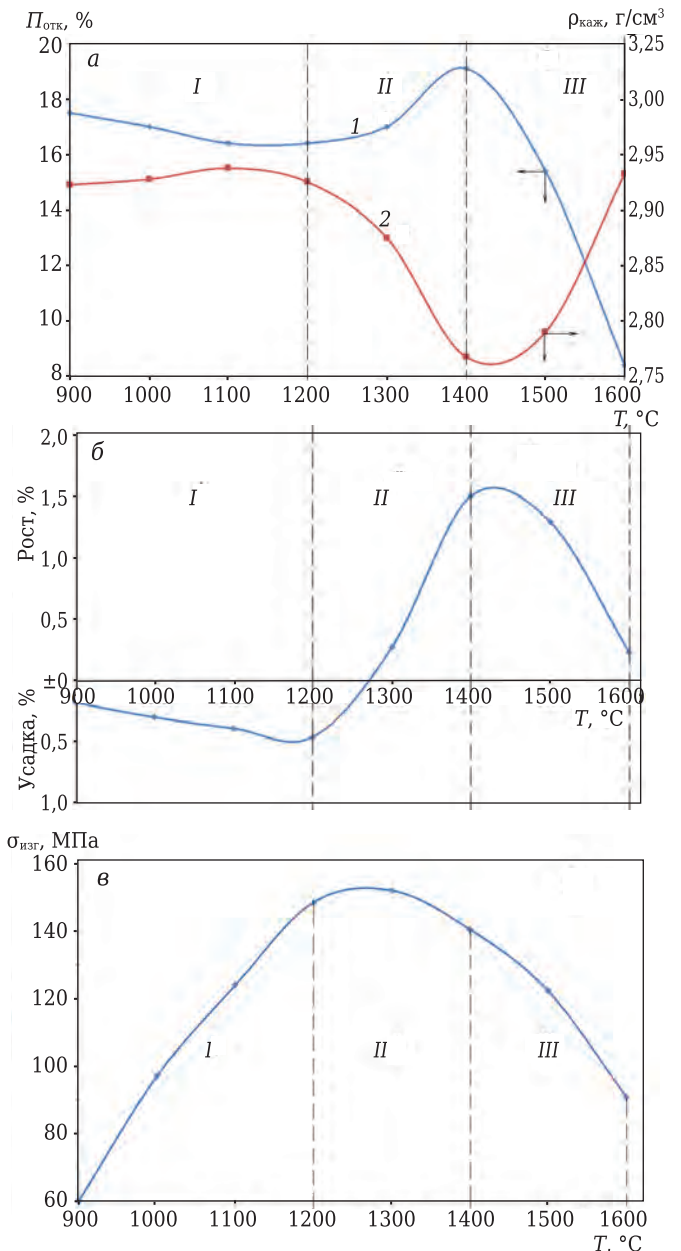


Рис. 4. Влияние температуры обжига T , °C, с изотермической выдержкой 1 ч на открытую пористость $P_{отк}$, кажущуюся плотность $\rho_{каж}$ (а), усадку или рост (б) и предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ (в) образцов на основе ВКВС композиционного состава; I–III — интервалы температур первичного спекания или усадки, преобладающей муллитизации, вторичного спекания замуллитизированного материала

ки, в интервале *II* преобладает муллитизация, сопровождаемая ростом. Процесс вторичного спекания или усадки после муллитизации материала осуществляется в интервале *III* при 1400–1600 °С.

Из рис. 4, б следует, что незначительная (0,05 %) усадка отмечается уже после термообработки при 900 °С, при 1000 °С она достигает 0,3 %. Максимальное значение усадки (0,46 %) отмечается после обжига при 1200 °С, дальнейшее повышение температуры обжига сопровождается ростом образца (до 0,27 % при 1300 и 1,5 % при 1400 °С). Вторичная стадия спекания замуллитизированного материала, протекающая при 1500 и 1600 °С (интервал *III*), сопровождается усадкой, которая уменьшает предыдущий рост образцов до 1,29 при 1500 °С и 0,23 % при 1600 °С. Следует отметить, что максимальная величина усадки в интервале *III* ($1,5 - 0,23 = 1,27$ %) существенно (в 2,7 раза) выше, чем в первичном интервале спекания (*I*).

На начальной стадии спекания (интервал *I*) $P_{отк}$ понижается примерно на 1,2 %, в интервале температур *II* вследствие муллитизации, сопровождаемой ростом, пористость увеличивается до 19,2 % (рис. 4, а). Значительное уменьшение пористости в интервале спекания *III* замуллитизированного материала сопровождается уменьшением $P_{отк}$ до 8,4 %.

В соответствии с показателями $P_{отк}$ заметное увеличение $\rho_{каж}$ происходит после обжига при 1100 °С, минимальное значение (2,77 г/см³) отмечается при температуре, соответствующей максимальному значению роста. В результате вторичного процесса спекания (интервал *III*) $\rho_{каж}$ существенно возрастает до значения 2,93 г/см³ (см. рис. 4, а).

Весьма примечательно, что $\rho_{каж}$ образцов после обжига при 1600 °С (2,93 г/см³) оказывается весьма близкой к исходной после термообработки при 900 °С (2,92 г/см³). И это несмотря на то, что показатели открытой пористости сопоставляе-

мых образцов различаются почти в 2 раза (8,4 и 17,4 % соответственно). Эта аномалия объясняется тем, что истинная плотность материала вследствие муллитизации существенно уменьшается по сравнению с исходной. Кроме того, после обжига при 1600 °С образуется закрытая пористость.

После относительно низкотемпературной обработки (900 °С), как показано на рис. 4, в, образцы характеризуются относительно высоким показателем $\sigma_{изг}$ (60 МПа), который резко увеличивается при повышении температуры обжига до 1000 °С (98 МПа). Максимальные значения $\sigma_{изг}$ (~150 МПа) достигаются после обжига в интервале 1200–1300 °С. Дальнейшее повышение температуры обжига вследствие муллитизации сопровождается значительным уменьшением $\sigma_{изг}$. Следует отметить, что образцы после обжига при 1400 °С характеризуются максимальной пористостью (см. рис. 4, а), но показатели их $\sigma_{изг}$ при этом достаточно высоки (130 МПа). Повышение температуры обжига до 1500 и 1600 °С хотя и сопровождается значительным уменьшением пористости (рис. 4, а), однако показатели $\sigma_{изг}$ образцов также значительно понижаются (вплоть до 90 МПа).

На рис. 5 показано, что в интервале режимов, сопровождающихся усадкой при первичном спекании (до 1200 °С), увеличение Y_L до 0,5 % сопровождается резким повышением $\sigma_{изг}$. Аналогичными показателями $\sigma_{изг}$ (около 150 МПа) характеризуются также образцы на начальной стадии муллитизации (рост до 0,5 %). Однако при значительной степени муллитизации материала (обжиг при 1400 °С), сопровождающейся ростом до 1,5 %, $\sigma_{изг}$ заметно снижается (до 130 МПа).

Несмотря на значительную степень спекания замуллитизированного материала после обжига при 1500 и 1600 °С (см. рис. 5), сопровождаемого значительным уменьшением измеряемого показателя роста (участок *III* на кривой рис. 5), значения $\sigma_{изг}$ существенно уменьшаются. Из сопоставления значений $\sigma_{изг}$ образцов после обжига при 1300 °С (рост около 0,3 %) и 1600 °С (рост около 0,2 %) следует, что $\sigma_{изг}$ в первом случае (150 МПа) в 1,6 раза выше, чем во втором. Следует отметить, что аналогичная зависимость показателей $\sigma_{изг}$ при 1500 и 1600 °С была отмечена при изучении высокоглиноземистых материалов на основе ВКВС и других составов [9–11].

Установлению и изучению факторов, вызывающих значительную потерю прочности материала после высокотемпературного обжига, предполагается посвятить специальное исследование. Не исключена возможность того, что вследствие значительного содержания примесей в материале (Fe_2O_3 , CaO , MgO) при высоких температурах обжига происходит образование стеклофазы сложного состава и частичное растворение муллита, что вызывает падение прочности.

Из представленных на рис. 4 и 5 данных следует, что в интервале температур первичного

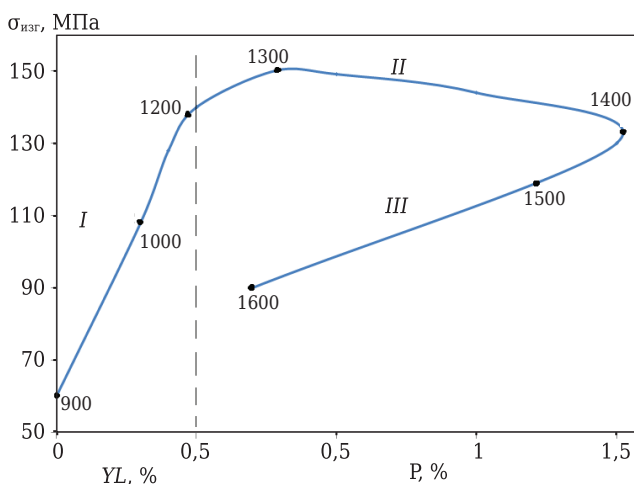


Рис. 5. Влияние усадки Y_L или роста P на $\sigma_{изг}$ образцов, обожженных с выдержкой 1 ч при температурах, °С, указанных на кривой; *I–III* — интервалы температур первичного спекания и усадки, муллитизации и роста, спекания замуллитизированного материала

спекания (до 1200 °C) при весьма низких значениях линейной усадки достигаются высокие показатели механической прочности. Такое явление было отмечено ранее при изучении материалов на основе ВКВС высокоглиноземистого состава [13, 16].

С учетом того что при этом значения $P_{отк}$ по сравнению с исходной понижаются только на 1–1,2 % (см. рис. 4), максимальные показатели $\sigma_{изг}$ достигаются при доле спеченных пор 0,06–0,08. Это сопоставимо с результатами спекания отливок на основе ВКВС плавленного кварца [18].

Дилатометрические исследования спекания и муллитизации материала в режиме неизотермического нагрева

С целью получения дополнительной информации, касающейся не только спекания и муллитизации материала рассматриваемого состава, но и данных, касающихся его теплового расширения, проведены дилатометрические исследования*2 как исходного образца после сушки (рис. 6), так и предварительно обожженного в туннельной печи для обжига динаса (рис. 7).

На рис. 6 представлена зависимость относительного изменения линейных размеров высушенного образца на основе ВКВС композиционного состава в процессе как неизотермического нагрева со скоростью 5 °C/мин (1), так и последующего охлаждения (2).

Как и в ранее рассмотренных работах [5–7], заметное спекание (усадка 0,11 %) проявляется при 1000 °C. При 1100, 1200 и 1300 °C усадка увеличивается до значений 0,25, 0,42, 0,5 соответственно. При нагреве до 1400 °C отмечается рост образца, который полностью компенсирует предшествующую усадку. Рост образца в результате неизотермического нагрева после его охлаждения, как это следует из разницы между прямыми 1 и 2 рис. 6, составляет 1,4 %. Следует отметить, что материал рассматриваемого состава на заключительной стадии нагрева (интервал 1400–1500 °C) не спекается (не происходит усадки), как это было отмечено в других работах [7–10].

Предварительно обожженный образец с продолжительностью пребывания в интервале 1300–1390 °C около 50 ч при нагреве вплоть до 1400 °C характеризуется обычным тепловым расширением (см. рис. 7). В области нагрева от 1400 до 1500 °C отмечается незначительная (около 0,1 %) усадка. Тепловое расширение образца при 1000 °C после изотермического нагрева (см. рис. 6, прямая 2) составляет 0,68 %, предварительно обожженного (см. рис. 7) — 0,60 %. Это может свидетельствовать о различном фазовом составе сравниваемых образцов.

*2 Дилатометрические измерения выполнены А. Ю. Колобовым.

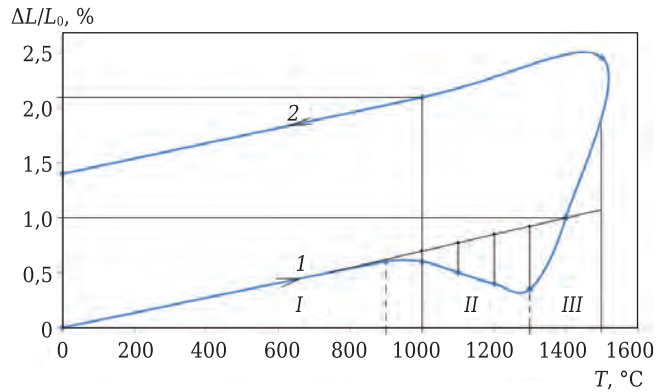


Рис. 6. Зависимость относительного изменения линейных размеров $\Delta L/L_0$ высушенного образца от температуры T неизотермического нагрева со скоростью 5 °C/мин (1) и произвольного охлаждения (2); I–III — интервалы температур теплового расширения, спекания или усадки, муллитизации и роста

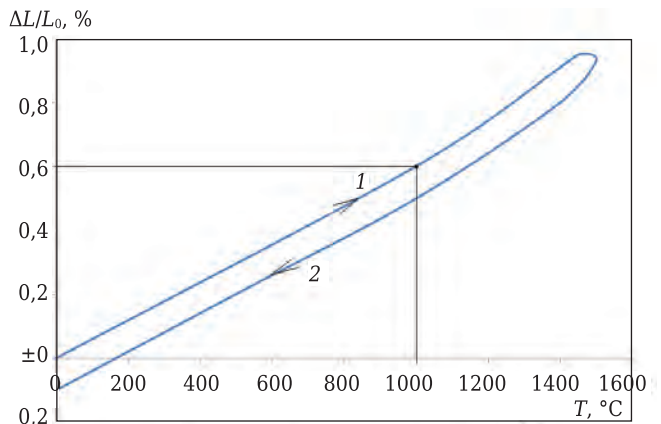


Рис. 7. Зависимость относительного изменения линейных размеров $\Delta L/L_0$ образца после его продолжительного обжига в туннельной печи от температуры T неизотермического нагрева со скоростью 5 °C/мин (1) и произвольного охлаждения (2)

Как показано в предыдущих исследованиях [7–10], для получения дополнительной информации, касающейся механизма спекания и образования вторичного муллита, а также для определения специфических в этом отношении интервалов температур, представляется целесообразным провести сопоставление и анализ уровней линейных изменений образцов (усадки или роста) при сопоставимых температурах в случае неизотермического нагрева (см. рис. 6) и изотермической выдержки 1 ч при обжиге образцов (см. рис. 4). При этом исходили из того, что скорость подъема температуры в дилатометре, а также в процессе нагрева до заданной температуры изотермической выдержки при обжиге образцов была одной и той же (5 °C/мин, или 300 °C/ч). В связи с этим вполне обоснованно можно считать, что обожженные образцы перед началом изотермической выдержки характеризовались такими же показателями усадки или роста, как и образцы при нагреве в дилатометре до соответствующей температуры.

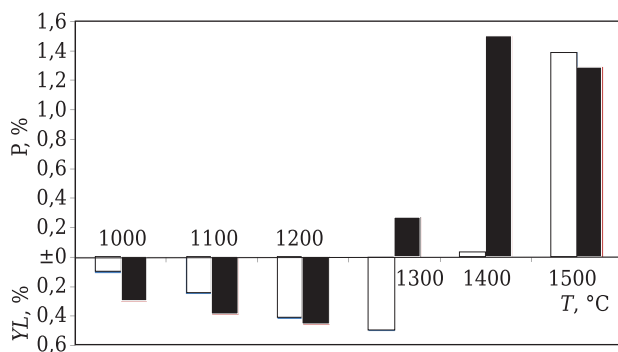


Рис. 8. Влияние температуры неізотермического нагрева (□) и изотермической выдержки на протяжении 1 ч (■) образцов на основе ВКВС композиционного состава на их усадку и рост

Сопоставительные данные по кинетике спекания и муллитизации образцов на основе ВКВС композиционного состава в режиме их неізотермического нагрева со скоростью 5 °C/мин (300 °C/ч) и обжига с продолжительностью изотермической выдержки 1 ч представлены на рис. 8.

По мере повышения температуры от 1000 до 1100 и 1200 °C доля усадки при неізотермическом нагреве по сравнению с этими показателями для изотермического обжига (см. рис. 8, ■) постепенно повышается от 0,25 до 35 и 90 %. Это свидетельствует о том, что в интервале температур изотермической выдержки 1150–1200 °C проявляется механизм начальной стадии муллитизации, сопровождающийся ростом и, как следствие, заметным уменьшением усадки.

Как показано на рис. 8, усадка в процессе неізотермического нагрева увеличивается вплоть до 1300 °C, составляя при этом 0,49 %. Изотермическая выдержка материала при этой температуре вследствие интенсивно протекающего процесса муллитизации и сопутствующего эффекта роста не только компенсирует предшествующую усадку, но и по сравнению с исходным размером образца показывает рост 0,27 %. Повышение температуры до 1400 °C способствует муллитизации материала в режиме неізотермического нагрева. Происходит компенсация предшествующей усадки, и поэтому реальный рост образца по сравнению

с исходным находится на уровне 0,01 %. Для материала изотермического спекания при повышении температуры от 1300 до 1400 °C показатель роста увеличивается более чем в 5 раз (до 1,5 %).

При максимальной температуре нагрева (1500 °C) показатель роста образца (см. рис. 8, □) достигает максимального значения (1,4 %). Для образца, подвергнутого изотермическому обжигу при 1500 °C значение роста (1,29 %) заметно ниже, чем при предшествующей температуре (1,5 % при 1400 °C). Этот факт объясним частичным спеканием или усадкой замуллитизированного материала, а соответственно, и заметной компенсацией предыдущего роста. Еще более значительная усадка при этом отмечена после обжига при 1600 °C, в результате которого показатель роста уменьшился до 0,23 % (см. рис. 4, б).

Из приведенных в настоящей статье данных следует, что ВКВС композиционного состава, содержащие в качестве одного из компонентов плавный корундобоксит, характеризуются сопоставимой с необходимой для других ВКВС высокоглиноземистого состава продолжительностью мокрого измельчения. Отличительной особенностью материала являются повышенные значения $\sigma_{изг}$ (около 150 МПа), достигаемые при незначительных (0,5 %) усадках в интервале температур обжига 1200–1300 °C.

Таким образом, проведены исследования по получению ВКВС композиционного состава с использованием в качестве базового материала не только спеченного китайского боксита (45 %), но и плавного корундобоксита (93,4 % Al_2O_3), полученного из технического глинозема и гайанского боксита. Введение в состав ВКВС высокодисперсного плавного кварца (10 %) обеспечивает не только реализацию процесса мокрого измельчения с одностадийной загрузкой материала при высокой объемной концентрации ($C_v = 0,70$), но и гетеростабилизацию ВКВС, а также определяет относительно низкотемпературное образование муллита и повышенную термостойкость материала. Максимальные показатели $\sigma_{изг}$ (150 МПа) достигаются после обжига при температурах начальной стадии муллитизации (1200–1300 °C).

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 1. Высокоглиноземистый боксит как базовый сырьевой компонент / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, В. А. Перепелицын // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 16–23.
2. **Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 1. High-alumina bauxite as a basic raw material component / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, V. A. Perepelitsyn // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 344–350.
3. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе вы-

сокоглиноземистых ВКВС. Часть 2. Характеристика исходных компонентов и отливок на основе ВКВС композиционного состава. Изучение начальной стадии процессов спекания и муллитизации / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 50–57.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 2. Properties of starting components and castings based on composite composition HCBS. Study of the initial stage of sintering and mullitization / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 5. — P. 544–550.

3. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические и огнеупорные материалы : избр. тр. В 3 т. Т. 2 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Стройиздат СПб, 2003. — 668 с.

4. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 9. Получение и свойства смешанных ВКВС состава: плавный бокситокорунд, кварцевое стекло, реактивный глинозем. Дилатометрические исследования материалов на их основе / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колобов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 39–45.

5. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 3. Влияние температуры обжига на спекание и муллитизацию материалов, полученных на основе ВКВС композиционного состава / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Остряков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 25–33.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 3. Effect of firing temperature on sintering and mullitization of materials prepared on the basis of composite HCBS / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, L. V. Ostryakov // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 6. — P. 648–655.

6. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 4. Влияние добавок огнеупорной глины на свойства ВКВС композиционного состава, отливок и материалов на их основе / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 25–33.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 4. Effect of refractory clay addition on properties of compound composition HCBS, castings and materials based on them / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 70–76.

7. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 5. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных из композиционных ВКВС с добавкой огнеупорной глины / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Остряков // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 24–29.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 5. Effect of firing temperature on properties of materials prepared from composite HCBS with addition of refractory clay / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, L. V. Ostryakov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 180–184.

8. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 6. О процессе муллитизации и тепловом расширении материалов на основе ВКВС композиционного состава / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 31–38.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 6. Mullitization and thermal expansion of materials based on compound composition HCBS / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 297–303.

9. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 7. О спекании и вторичном муллитообразовании материалов на основе ВКВС композиционного состава в процессе неизотермического нагрева и изотермического обжига / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 42–51.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part

7. Sintering and secondary mullite formation of materials based on composite composition HCBS during nonisothermal heating and isothermal firing / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 5. — P. 536–544.

10. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 10. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных на основе ВКВС смешанного состава: плавный бокситокорунд, кварцевое стекло, реактивный глинозем / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. М. Гороховский, Л. В. Остряков // Новые огнеупоры. — 2017. — № 4. — С. 37–43.

11. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 8. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных на основе смешанных ВКВС состава: боксит, кварцевое стекло, реактивный глинозем / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 12. — С. 26–35.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 8. Effect of firing temperature on properties of materials based on mixed HCBS composition: bauxite, quartz glass, and reactive alumina / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 6. — P. 637–644.

12. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические вяжущие и керамобетоны / Ю. Е. Пивинский. — М.: Металлургия, 1990. — 274 с.

13. **Пивинский, Ю. Е.** Получение и свойства вяжущих высокоглиноземистых суспензий в системе боксит – кварцевое стекло / Ю. Е. Пивинский, Д. А. Добродон // Новые огнеупоры. — 2002. — № 5. — С. 19–26.

14. **Пивинский, Ю. Е.** Неформованные огнеупоры. В 2 т. Т. 1. Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. — М.: Теплоэнергетик, 2003. — 448 с.

15. **Пивинский, Ю. Е.** Теоретические аспекты технологии керамики и огнеупоров: избр. тр. Т. 1 / Ю. Е. Пивинский. — СПб.: Стройиздат, 2003. — 544 с.

16. **Пивинский, Ю. Е.** Получение и свойства корундовых ВКВС и керамобетонов. Ч. 1. Смешанные ВКВС в системе электрокорунд – высокодисперсное кварцевое стекло / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 1. — С. 28–36.

Pivinskii, Yu. E. Preparation and Properties of corundum HCBS and ceramic concretes. Part 1. Mixed HCBS in the system electrocorundum — very fine quartz glass / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 1. — P. 25–31.

17. **Пивинский, Ю. Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении: избр. тр. В 3 т. Т. 3 / Ю. Е. Пивинский. — СПб.: Политехника, 2012. — 682 с.

18. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавного кварца. Часть 6. Влияние температуры обжига на спекание и кристобалитизацию материалов / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 7. — С. 22–31.

Pivinskii, Yu. E. Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 6. Effect of firing temperature on material sintering and cristobalite formation / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 366–373. ■

Получено 23.06.16

© Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин,
Л. В. Остряков, 2017 г.